

UNIVERSIDAD DE MENDOZA (UM) INSTITUTO PARA EL ESTUDIO DEL  
MEDIO AMBIENTE (IEMA)

## **NUEVOS MÉTODOS DE MEDICIONES CLIMÁTICAS**

*Prof. Dipl. - Ing. Carlos Puliafito, Prof. Dr. Ing. S. Enrique Puliafito*

"Seminario interdisciplinario: La Crisis Ecológica: Perspectivas Filosófica,  
Científica, Ambiental y Jurídica"  
Mendoza, 12 y 13 de Octubre de 1995

### **RESUMEN**

Las investigaciones recientes han demostrado que la actividad humana está afectando los procesos naturales de la atmósfera, y en consecuencia las condiciones de vida sobre la Tierra. Un ejemplo conocido de ello es la disminución del ozono en la estratosfera, con su efecto sobre la biosfera, o el aumento en la temperatura media global (efecto invernadero adicional). Algunos gases naturales, llamados fuentes, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxidodinitrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), cloruro de metilo ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) y el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), han aumentado considerablemente como consecuencia de la acción humana (acción antrópica). Asimismo otros gases que son productos exclusivos de la actividad industrial como por ejemplo los hidrocarburos halogenados o CFC o bien el tricloro fluormetano ( $\text{CCl}_3\text{F}_2$ ), dicloro difluormetano ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) y otros, están modificando los procesos fotoquímicos de la atmósfera. Ambos aumentos son los responsables, entre otros, de la disminución de la capa de ozono o del aumento del efecto invernadero. Existen principalmente dos métodos de medición de parámetros atmosféricos: métodos "in situ" y de sensado remoto, poseyendo cada uno de ellos ventajas sobre el otro.

En este artículo se describen los principios y la metodología utilizados en las mediciones de sensado remoto e "in situ" de parámetros atmosféricos, como así también algunos de los instrumentos utilizados actualmente. Asimismo, parte del instrumental aquí detallado se utiliza diariamente en el Instituto para el Estudio del Medio Ambiente (IEMA), dependiente de la Universidad de Mendoza, para el monitoreo de la calidad de aire, como así también en el seguimiento de la evolución de la capa de ozono y vapor de agua correspondiente a la Provincia de Mendoza.

## **I. Introducción**

La preocupación por los cambios globales en el clima y el medio ambiente, y sus consecuencias para la humanidad, ha crecido constantemente en los últimos años. La investigación del cambio global es un estudio orientado, cuyo resultado debe proveer opciones especialmente al nivel de decisiones políticas. Entre los problemas ambientales más urgentes producidos por la actividad del hombre, podemos citar:

1. los cambios en la atmósfera resultantes de un calentamiento adicional ("efecto invernadero"),
2. la destrucción de la capa de ozono estratosférico,
3. los cambios en los océanos y regiones polares,
4. las amenazas a los ecosistemas terrestres y la diversidad de especies.

Debido a la múltiple interacción y realimentación de estos problemas globales, la estrategia de investigación debe conducir a integrar los conocimientos multidisciplinarios y las variadas actividades actualmente en marcha. Las herramientas científicas más importantes para la investigación en esta área son: el sensado remoto, las bases de datos, los modelos de computadoras y la cooperación interdisciplinaria.

Si se desea identificar los cambios en el sistema Tierra y simultáneamente reconocer los efectos antrópicos de los cambios y ciclos naturales, es necesario disponer de una larga serie de datos. Esto se logra actualmente a través del sensado remoto, por ejemplo desde plataformas satelitales. Las mediciones desde estaciones terrestres fijas, plataformas aéreas, satelitales o en globos, permiten la adquisición de grandes volúmenes de datos, que permiten grabar los cambios en el sistema terrestre. Los métodos

de sensado remoto no sólo dan una interpretación de las relaciones dentro del sistema, sino que a menudo son el único medio para determinar los importantes parámetros climáticos y ambientales a escala global.

## 2. Técnicas de medición

Se pueden distinguir dos tipos de métodos de observación o medición:

1. *Métodos In situ*, es decir, el instrumento sensor está en contacto directo con el "sujeto" bajo investigación. Algunos son: métodos físicos, métodos químicos y métodos biológicos.

2. *Métodos de sensado remoto*, es decir, el instrumento sensor está lejano o remoto del "sujeto" y no en contacto directo. Estos están basados en la propagación de tres tipos de ondas: ondas acústicas, ondas electromagnéticas (de 0 a  $10^{23}$  Hz) y onda de partículas.

El espectro electromagnético puede dividirse en:

1. Radiofrecuencias ( $30$  a  $1,2 \times 10^{10}$  Hz).
2. Microondas ( $1 \times 10^9$  a  $3 \times 10^{12}$  Hz).
3. Infrarrojo ( $3 \times 10^{12}$  a  $3,75 \times 10^{14}$  Hz).
4. Visible ( $3,95 \times 10^{14}$  a  $7,89 \times 10^{14}$  Hz).
5. Ultravioleta ( $7,89 \times 10^{14}$  a  $3 \times 10^{16}$  Hz).
6. Rayos X y otros ( $3 \times 10^{16}$  a  $10^{23}$  Hz).

Debido a la interacción de estas ondas con el medio entre el sujeto y el sensor, se pueden distinguir otros cinco criterios:

1. Absorción, atenuación.
2. Reflexión, dispersión.
3. Refracción.
4. Difracción.
5. Emisión-transmisión.

Cuantitativamente estos efectos pueden describirse a través del índice de refracción del sujeto bajo investigación y el del medio por donde la onda se propaga. Esto implica que para las mediciones de sensado remoto, el índice

de refracción, como función de la frecuencia, el espacio y el tiempo, es la cantidad física más importante.

Ya que es posible usar para nuestras investigaciones fuentes de radiación natural o artificial (producida por el hombre), podemos citar dos nuevos criterios de clasificación de las técnicas de medición:

1. Sensado remoto pasivo, usando fuentes de radiación natural
2. Sensado remoto activo, usando fuentes de radiación artificial.

En general, se puede afirmar que debido al contacto físico directo entre el objeto o proceso bajo estudio y el sensor del aparato de medición, los métodos "in situ" son más exactos que los métodos de sensado remoto. Como contrapartida, los métodos de sensado remoto permiten obtener información de objetos o procesos alejados del sensor del instrumento de medición. Esta información sería imposible o muy costosa obtenerla con el método anterior. Los métodos de sensado remoto son más ventajosos si se desea implementar una red o sistema de alerta temprana para monitoreo de parámetros atmosféricos. Por ende, ambos métodos son útiles y necesarios, de tal forma que ambas informaciones, si son factibles de obtenerlas, sirven para validación de la información recogida por ambos métodos. Para cada medición, el parámetro más crítico es la estabilidad, es decir la ausencia de errores sistemáticos. Un error sistemático es aquél que está siempre presente. Este error podría ser calculado, en teoría, midiendo el valor medio de la variable, por ej., columna total de ozono, y restarla del valor medio "verdadero". A esto se lo denomina *exactitud* de una medición. Se entiende por *precisión* de una medición a las variaciones aleatorias, es decir a las variaciones que un instrumento mide, cuando se mide un valor constante. Este parámetro es importante si sólo se tienen unos pocos datos, si se poseen una gran cantidad de mediciones realizadas en forma similar, la variación se reduce mediante el promediado de grandes volúmenes de datos. Por lo tanto, en detección de cambios globales, por ejemplo, es más importante la exactitud de la medición.

### **3. Mediciones "in situ"**

A continuación describiremos el principio de funcionamiento de algunos instrumentos típicos utilizados para el monitoreo de parámetros atmosféricos.

#### **3.1. Analizador de ozono superficial. (APOA -350 E) HORIBA.**

La técnica de medición de absorción ultravioleta (UV) se basa en la característica del ozono de absorber ciertas longitudes de onda de luz ultravioleta. En el modo de análisis, la muestra de gas filtrado se divide en dos canales. Uno pasa a través de un deozonizador catalítico, el cual quita el ozono de la muestra de aire. Este gas se introduce a la celda de referencia, mientras que el otro pasa directamente a la celda de muestra. Por lo tanto, la muestra de gas y el gas de referencia se miden separadamente al mismo tiempo. Dentro del detector de muestras, la luz ultravioleta con un máximo en 253,7 nm proveniente de una lámpara de mercurio de baja presión se enfoca a la celda de medición donde el ozono absorbe la luz ultravioleta. Esta absorción se mide mediante un fototubo y se amplifica convenientemente para proveer una señal eléctrica proporcional adecuada. El mismo proceso se aplica a la celda de referencia. La diferencia entre la salida del detector de muestras y de referencia es la absorción de UV mediante ozono.

#### **3.2. Ozonosondas a bordo de globos.**

Estos instrumentos vuelan en globos meteorológicos (radiosondas) hasta aproximadamente 30 km. Utilizan un método de quemiluminiscencia, o un detector electroquímico a través del principio de oxidación del potasio iódico (KI) como reacción básica. En 1969 se desarrolló una ozonosonda (llamada ECC) usando la reacción del ozono con el KI pero con cátodo y ánodos de platino. Debido a la composición química de los electrodos, la sonda ECC no se deteriora con el uso, permitiendo su reutilización. Los valores calculados con estas sondas coinciden muy bien con los valores medidos con el instrumento Dobson. La incertidumbre de estas sondas es del 10 % para la troposfera y 4 % en la estratosfera.

### 3.3. Etalómetro.

Este instrumento funciona bajo el principio de medición de la atenuación de un haz de luz transmitida a través de un filtro que recoge continuamente una muestra de aerosol. La cantidad acumulada de negro de humo (hollín) en la mancha depositada en la cinta (filtro) es proporcional tanto a la concentración de negro de humo en el aire y al flujo de aire entrante. El filtro de cuarzo se cubre de un cuerpo cilíndrico transparente, el cual permite el pasaje del flujo de aire muestreado. El flujo se conduce a través de una superficie de 1,13 cm<sup>2</sup> del filtro, mientras que otra porción del filtro se ilumina mediante una lámpara estabilizada proveyendo luz difusa a través de la entrada transparente del flujo de aire.

La luz que pasa a través de las porciones de "sensado" y "referencia" del filtro se acopla a dos computadoras. Éste calcula la atenuación óptica:

$$A = - \ln (I/I_0)$$

la cual es proporcional a la cantidad de negro de humo recogida en el filtro.

La tasa de incremento del negro de humo nos da la concentración de hollín en el flujo de aire muestreado cuando se conoce la velocidad de flujo.

La óptica y la electrónica pueden detectar un incremento mínimo de menos de 1 nanogramo/cm de hollín en el filtro.

En lo que respecta a la medición de poliaromáticos (principalmente referidos a los gases de la combustión), este instrumento posee una entrada para el gas bajo estudio. El gas es sometido a radiación ultravioleta. La energía de los fotones se elige de tal modo que sólo las partículas que contienen moléculas poliaromáticas se vean ionizadas. Estas partículas son luego aceleradas y los electrones libres, productos de la ionización, son absorbidos por un electrodo preparado para tal fin. Los iones positivos son recogidos en un filtro de medición altamente aislado. Luego, estas cargas positivas son amplificadas mediante un amplificador de alta sensibilidad, convirtiendo la cantidad de partículas en una señal de tensión proporcional a la medición. La salida se da en ng/m<sup>3</sup>

### **3.4. Espectrometría de masas. Cromatografía de gases.**

El espectrómetro de masas es utilizado, generalmente, en conjunto con un cromatógrafo de gases cuando se requiere mediciones precisas de monitoreo de calidad de aire. El principio de un espectrómetro de masas se basa en la separación de las moléculas del gas bajo estudio de acuerdo a su número másico. Esto se realiza mediante la ionización de la muestra a la entrada del espectrómetro. Una vez que las moléculas resulten ionizadas, éstas pueden acelerarse de acuerdo con la tensión aplicada al sistema separador y a la relación carga sobre masa de cada molécula ionizada. Una vez aceleradas, éstas son detectadas convenientemente con detectores de partículas, y mediante un contador electrónico, se puede contabilizar el número de partículas de un mismo número másico.

La cromatografía de gases es una herramienta poderosa para el análisis químico de una muestra de gas dada. La cromatografía es un método físico de separación, en el cual los componentes que se van a separar se distribuyen entre dos fases; una de estas fases constituye una capa estacionaria de gran área superficial, la otra es un fluido que fluye a través o a lo largo de la fase estacionaria. La fase estacionaria puede ser un sólido o un líquido y la fase móvil puede ser un líquido o un gas. De este modo, todos los tipos de cromatografía que se conocen caen en cuatro categorías: líquido-sólido, gas-sólido, líquido-líquido y gas-líquido. En todas las técnicas cromatográficas, los solutos que se van a separar migran a lo largo de la columna y, por ende, la separación se basa en las diferentes velocidades de migración de los diferentes solutos. Mientras que el proceso de separación ocurre en la columna capilar, en su extremo final se detectan los solutos que se separan y van saliendo de la columna. Los detectores se clasifican en dos tipos: integrales y diferenciales. Un detector integral proporciona en cualquier instante una medición de la cantidad de material soluto que ha pasado a través de él hasta ese momento. Los detectores diferenciales nos dan los cromatogramas familiares que consisten de picos en vez de etapas. Si se utiliza como detector de un cromatógrafo de gases a un espectrómetro de masas, la resolución de de aquel se incrementa sensiblemente, facilitando la detección de sustancias desconocidas.

## **4. Sensado remoto pasivo**

### **4.1. Espectroscopia en el rango de las microondas**

Muchos constituyentes de la atmósfera muestran resonancias en el rango de las ondas milimétricas (por debajo de los 300 GHz) - transición rotacional de la molécula, mediante el uso de los actuales radiómetros espectrómetros es posible medir la débil radiación térmica emitida por la atmósfera - esta radiación también es llamada temperatura de brillo - como función de la frecuencia, con suficiente exactitud que permiten mediante la utilización de los llamados procedimientos de inversión, determinar, por ej., la temperatura, presión y concentración de gases en la atmósfera como función de la altura. De acuerdo al tipo de plataforma utilizada (terrestre, satélite, etc.), es posible obtener perfiles en altura hasta aproximadamente los 100 km. Así por ejemplo, del análisis espectral de la molécula de oxígeno alrededor de los 60 GHz es posible determinar los perfiles en altura de la temperatura y la presión. De la transición de la molécula de agua (H<sub>2</sub>O) en 22 GHz o 183 GHz pueden establecerse los perfiles de vapor de agua. En 142 GHz o 184 GHz pueden establecerse el perfil en altura de la concentración de la molécula de ozono (O<sub>3</sub>). Del análisis espectral en 204 GHz o 278 GHz pueden inducirse el perfil de la molécula de monóxido de cloro (ClO), etc. Se entiende por radiometría, la técnica de sensado remoto pasivo de medición de energía electromagnética que se presenta como radiación térmica. Todo objeto que se encuentra a una temperatura superior al cero absoluto (0°K), radia energía electromagnética, por ejemplo en el rango de las microondas. Un sujeto afectado de una onda electromagnética, reflejará parte de esta radiación, otra parte la absorberá, para luego volver a emitirla. La absorción y emisión de radiación natural puede formularse a través de la llamada ecuación de transferencia de radiación.

Mediante la radiometría en las microondas es posible determinar la concentración de los gases trazas de la atmósfera en forma continua y simultánea. A diferencia de los métodos in situ, los perfiles abarcan un rango mayor de altura, si bien la precisión de los métodos in situ, pueden ser superiores. Algunas ventajas de los métodos radiométricos en ondas milimétricas son:

1. Poseen mayor sensibilidad en la atmósfera media, porque la información viene contenida en el ensanchamiento de la línea espectral (pressure broadening").



2. En el espectro de las microondas, se cumple aproximadamente la condición de equilibrio termodinámico. Además, las líneas espectrales son líneas únicas (espectro rotacional). En el espectro infrarrojo o ultravioleta se presenta en forma de bandas. Esto implica mayor simplicidad en los cálculos de las intensidades, ya que no es necesario conocer los estados cuánticos vibracionales y electrónicos como se requieren en los otros rangos de frecuencias. Sin embargo, en este rango de frecuencias las intensidades de emisión en el rango de las microondas son menores a las de las frecuencias superiores.

A modo de ejemplo, podemos citar que los perfiles de ozono pueden determinarse entre 15 a 70 km aproximadamente para instrumentos operados desde superficie con una resolución de 8 a 10 km. La precisión es de 1 ppm en el volumen. Los errores estadísticos son del 15 %. Debe notarse que la precisión de estos instrumentos puede mejorarse usando puestos de observación en lugares de gran altura (aprox. 3000 m.s.n.m.).

#### **4.1.1. Radiómetro-espectrómetro de ondas milimétricas**

Un radiómetro, es en esencia un receptor de muy alta frecuencia. Este receptor posee por una antena que capta la radiación en el rango de las microondas. Esta radiación se mezcla en un diodo mezclador con un subarmónico de la frecuencia del oscilador local. La frecuencia intermedia (IF) se amplifica y se conduce al analizador espectral, que determina el espectro de potencia. Como oscilador local (OL) se usa un diodo Gunn cuya frecuencia puede variarse con un diodo varactor. Para obtener una resolución espectral de, por ejemplo, 50 kHz es necesario estabilizar el OL por medio de un circuito PLL (Phase Lock Loop). El espectrómetro, en general está compuesto por un banco de filtros de variable resolución, que permite una transformación de Fourier en tiempo real. El Analizador óptico de espectro AOSA, el espectrómetro de transformación Chirp (CTS) junto al banco de filtros convencionales de alta resolución, son al presente los más utilizados. Finalmente la salida del espectrómetro es digitalizada y almacenada en la computadora.

#### **4.2. Espectroscopia en el rango del infrarrojo**

La espectroscopia de absorción solar ha sido, y continúa siendo, un método poderoso para muestrear la atmósfera terrestre. La ventaja particular que

ofrece la espectroscopia infrarroja es que la mayoría de las especies atmosféricas poseen alguna absorción en el infrarrojo. El desarrollo de espectrómetros confiables de alta resolución ha significado, para el infrarrojo, que es posible encontrar alguna región, del espectro mencionado, donde la especie (o las especies) de interés, presente una absorción aislada respecto de otras especies, y de ese modo, sea factible encontrar su abundancia, y hasta incluso determinar su distribución vertical. La espectroscopia de absorción en el infrarrojo basada en tierra, está limitada en términos generales, a dos absorbedores muy fuertes, a saber: el dióxido de carbono y el vapor de agua. Consecuentemente, la capacidad para medir otras especies atmosféricas se ve mejorada con la elevación, es decir, a medida que uno asciende respecto del nivel del mar, gran parte de las concentraciones de vapor de agua y de dióxido de carbono disminuyen, dado que los máximos de estas concentraciones se hallan en la troposfera (hasta 8 km. de altura). Algunos grupos científicos utilizan globos, aviones o hasta plataformas espaciales para poder eliminar este problema. Estos métodos resultan, por lo general, muy caros, y adicionalmente, no representan mediciones continuas y de larga duración como para observar la tendencia de las concentraciones de ciertas especies en el tiempo. Un ejemplo de esto es el estudio de la evolución de los gases que producen el "calentamiento por efecto invernadero" y el decrecimiento del ozono atmosférico. Con instrumentos basados en este principio, es posible medir la abundancia atmosférica de importantes gases tales como: HCL, HNO<sub>3</sub>, CFC, CLONO<sub>2</sub>, OCS, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, etc.

### **4.3. Espectroscopia en el rango visible y ultravioleta**

La espectroscopia de absorción permite monitorear la columna total de ozono desde el suelo. La atenuación de una radiación monocromática es proporcional a la cantidad de moléculas que se hallan en el camino, que interactúan con la radiación entrante. En el rango de las radiaciones ultravioletas y en las regiones visibles, la absorción se debe a transiciones electrónicas. En general, éstas son independientes de la temperatura y presión de la columna medida. Algunos instrumentos típicos se describen brevemente a continuación:

#### **4.3.1. Espectrómetro Dobson**

Este es el instrumento estándar de la Red Global de Monitoreo de Ozono. El espectrómetro Dobson mide las intensidades relativas en un par de longitud de ondas en la banda de absorción de ozono (300 - 350 nm) (Banda de Huggins), de donde se puede deducir la columna total de ozono. Las mediciones más precisas se realizan en las bandas denominadas AD (305,5 / 325,4 y 317,6 / 339,8 nm) con luz solar directa. Aquellas menos precisas pueden obtenerse con luz diurna difusa, cielos nublados o con iluminación lunar.

El instrumento Dobson posee una precisión, para valores medios anuales de largas series de tiempo, del 1 %. Para alcanzar (y mantener esta precisión) es necesario la calibración periódica con lámparas patrones, intercalibración con el Dobson patrón (N° 83), identificación y corrección para días nublados e interferencia con otras especies absorbentes en longitudes de ondas cercanas, calibración de las longitudes de onda, entre otros tantos procedimientos cuidadosos.

#### **4.3.2. Espectrómetro para el Monitoreo de Columna Total de Ozono (TOMS)**

El instrumento TOMS fue lanzado en la misión Nimbus-7 en 1978, y su objetivo era el monitoreo global de la columna total de ozono. Esto lo realiza midiendo la radiación reflejada proveniente de la atmósfera y la superficie terrestre. La columna de ozono se infiere midiendo en seis longitudes de onda en la banda Huggins (312,5 - 317,5 - 331,2 - 339,8 - 360 y 380 nm). Las primeras cuatro frecuencias, usadas de a pares se usan para calcular tres estimaciones de la columna de ozono por el método de la absorción diferencial, el cuarto par es independiente del ozono y se usa para calcular la radiación de fondo (albedo). Este método tiene una estabilidad intrínseca muy elevada, ya que realiza una medición relativa de la radiación reflejada por la superficie, y la irradiancia directa del sol a la misma longitud de onda. Sin embargo, para compensar niveles diversos de potencia recibida, se intercaló, entre el receptor y el camino del haz directo del sol, una placa difusora que se fue degradando con el tiempo. Luego de estudios de comparación se logró compensar este efecto de degradación, lográndose a una estabilidad del 1 % por década.

### **4.3.3. Espectrómetro de Radiación Solar Reflejada Ultravioleta (SBUV)**

Este espectrómetro mide la radiación solar ultravioleta que es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera, en manera muy similar al instrumento TOMS. Debido a que este instrumento también incorpora una placa difusora, su estabilidad está limitada por la degradación en el tiempo de dicha placa.

### **4.3.4. Ozonosondas a bordo de cohetes**

El ROCOZ-A es una ozonosonda compuesta por un radiómetro en el rango ultravioleta con cuatro filtros. Esta sonda asciende hasta 70 km de altura (apogeo) y comienza a medir en su descenso provisto de paracaídas. El radiómetro mide la irradiancia solar ultravioleta en la longitud de onda de sus filtros. La columna de ozono se calcula a partir de la atenuación del flujo solar, y de la posición" de la sonda, monitoreada por radar, a medida que el instrumento cae. Las mediciones de ozono tienen una precisión del 5 al 8%, con una resolución vertical de aproximadamente 4 km.

### **4.3.5. Sonda Brewer**

Este instrumento trabaja en el rango del ultravioleta entre 295 y 330 nm y permite obtener ozono atmosférico total y dióxido de azufre. Puede realizar mediciones directas automáticas con sol, hacia el zenith y mediciones con radiación proveniente de la luna. Por otro lado, también puede obtenerse información de la irradiancia espectral de UVB. Mediciones directas de ozono total pueden lograrse con una exactitud de +/- 1 %.

## **5. Sensado remoto activo**

### **5.1 Sistema lidar**

El sistema lidar ("light detection and ranging") es un método de sensado remoto activo, que permite mediciones de alta resolución espacial tanto de día como de noche. Un sensor lidar consiste de lasers, un sistema óptico, detectores ópticos, electrónica y un sistema de almacenamiento de datos. Un sistema activo, es una combinación de una fuente especial de luz y un sensor pasivo, estos se usan en general en forma de pulsos. El haz del láser interactúa con la atmósfera y la radiación dispersa de retorno (backscattering) se colecta en un telescopio o sistema óptico que se mide por medio de los detectores y el sistema electrónico.

Los sensores lidar pueden dividirse en varios tipos: directos y heterodinos. En los sistemas directos, la señal de corriente se genera en proporción directa con la potencia del láser recibida, esto es, la señal de respuesta se procesa a través de detectores del tipo cuadráticos, como por ejemplo tubos fotomultiplicadores, o detectores fotoconductivos, fotodiodos, etc. La información de frecuencia y fase se pierden en el proceso de detección. En los sistemas heterodinos, el mezclador usa un oscilador local para generar la frecuencia intermedia. Los sistemas lidar heterodinos tienen una sensibilidad mayor que los anteriores (por lo menos tres veces mayores), pero su tecnología se complica por el uso de un láser secundario y problemas de alineado.

Dependiendo de la aplicación, el láser seleccionado puede ser: láser de dióxido de carbono, láser ND YAG, láser de estado sólido de Alexandrite sintonizable, láser Dye o láser Excimer.

Los sistemas lidar, desarrollados hasta la fecha, pueden ser catalogados en cuatro categorías: lidar ventana, lidar de absorción, lidar de absorción diferencial (DIAL), y lidar Doppler. El lidar de absorción y los sistemas de sensores DIAL pueden utilizarse para monitoreo de especies atmosféricas. El lidar Doppler puede utilizarse para el estudio de vientos. Los sistemas lidar ventana pueden usarse para el estudio de la rugosidad de la corteza terrestre o de los perfiles verticales de los aerosoles.

Los sistemas lidar de absorción utilizan un láser pulseado como transmisor y un telescopio como receptor. Los pulsos láser son transmitidos hacia la atmósfera, donde son dispersados y devueltos (backscattering) por los aerosoles y moléculas hacia el receptor óptico. La longitud de onda del láser se elige, de modo tal, que se asegure que ésta coincida con la longitud de onda requerida para la absorción de la molécula del gas en estudio. La radiación reflejada se detecta en el receptor lidar, y finalmente, se determina su concentración.

Por ejemplo, para la medición de la distribución vertical de ozono mediante lidar se utiliza la técnica de absorción diferencial por láser (DIAL), la cual requiere de la emisión de dos láser a distintas longitudes de ondas caracterizadas por distintos coeficientes de absorción de ozono. Parte de la radiación láser dispersa que retorna a la superficie se recibe con un telescopio (o antena detectora), que luego es detectada mediante un fotomultiplicador, muestrándose a intervalos regulares. El tiempo de retorno de la señal es proporcional a la resolución en altura de la medición. De la diferencia de las señales a distintas longitudes de onda se obtiene la densidad de ozono en

función de la altura. Este principio es autocalibrante y por lo tanto adecuado para la detección de tendencias.

Dos tipos de errores afectan a estas mediciones: los errores estadísticos o aleatorios dependen de la relación señal a ruido, los errores sistemáticos dependen, por un lado, del cálculo del coeficiente de absorción del ozono usado y su influencia a la temperatura, y por otra parte a la caracterización del proceso físico de dispersión (dispersión de Mie o Raleigh) o a la absorción de otras moléculas tales como SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Los errores sistemáticos pueden reducirse con mediciones adicionales de perfiles verticales de temperatura o aerosoles (o usando modelos empíricos). Los errores estadísticos son menores al 3% en todo su rango de altura. Dependiendo de las longitudes de ondas utilizados pueden medirse perfiles troposféricos (0,5 a 8 km de altura) o estratosféricos (15 a 50 km de altura). Algunas de las aplicaciones más importantes del lidar son: altura de la base de las nubes, perfiles de aerosoles y nubes troposféricas, perfiles de aerosoles estratosféricos, perfiles de vapor de agua, columna total y/o perfiles de gases trazas tales como (O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CFC, etc.), perfiles de ozono estratosférico, perfiles de presión y temperatura troposférica, perfiles de vientos, densidad de OH, y otros.

## 6. Bibliografía

1. Hartmann, G.: "Remote sensing for the Observing, perceiving, and conserving utilization of the environment (Part 11)", Editorial Idearium, Universidad de Mendoza, UM 010806-0641-0491, 1989.
2. Fabián, P.: "Atmósfera y Medio Ambiente" Editorial Idearium, Universidad de Mendoza, UM 020306-0638-1190, 1990.
3. Puliafito, S.E.; Puliafito, C; Hartmann, G.; Hartogh, P.: "Determinación de la concentración de vapor de agua y ozono en la atmósfera media por medio de mediciones radiométricas", Editorial Idearium, Universidad de Mendoza, UM 020104-0624-0789, 1989.
4. Puliafito, S.E.; Puliafito, C; Hartmann, G: "Sensado remoto de parámetros atmosféricos mediante radiometría.", Editorial Idearium, Universidad de Mendoza, UM 020104-0610-0888, 1988.
5. Puliafito, C; Puliafito, S.E.; Loidl, A.; Hartmann, G: "Introducción a los sistemas radiométricos-espectrométricos". Editorial Idearium, Universidad de Mendoza, UM 020104-0608-0688. 1988.
6. Day, R.A.; Underwood A.: "Química analítica cuantitativa", Prentice Hall.

7. World Metreological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N° 20. "Scientific Assesment of Stratospheric Ozone: 1989."
8. World Metreological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N° 25. "Scientific Assesment of Ozone Depletion: 1991."
9. Manuales técnicos de los instrumentos descriptos.